DOI: 10.22067/jacsm.2022.74559.1084 *https://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir/?lang=en*

Identifying the Electromagnetic Linear Motor Parameters for Producing Inertial Force Using ARM Microcontroller*

Research Article

Mehran Mozaffari-Jovein[1]
Seyyed Alireza Davodi-Navokh[2]
Behnam Moetakef-Imani[3]

1. Introduction

One of the methods of force generation in actuators is the use of magnetic force obtained from two fixed and moving coils, which is the basis of the operation of electromagnetic actuators. One of the most famous types of these actuators is VCM, which is also called an electromagnetic motor. The difference between these actuators and others is their very high output acceleration, which creates a high response speed and implements the input command signal with good accuracy. To control the output force of the magnetic actuator, it is necessary to first perform an identification test on the dynamic system, in which the chirp variable frequency signal is used as an input or reference signal to evaluate the behavior of the actuator at different frequency values. In the process of generating the identification signal by the STM32F746ZG card to increase the data rate of the digital-to-analog converter, the direct memory access unit related to the card is set up, which causes the data to be transferred in real-time from the memory to the digital-to-analog converter. The review of the previous researches in the field of actuators indicates the diversity of experiments for achieving more precise control of the output force of the actuator, but in most of these cases, the problem of identifying the dynamic parameters of the actuator and the way of generating the desired reference signal with control cards has not been specifically explained.

2. Test setup

As in Figure 1, in the test platform designed to identify the dynamic parameters of the actuator, a dynamometer manufactured by the Swiss company KISTLER was used to measure dynamic forces, which has the ability to measure force in three axes. Due to the low output voltage level of the dynamometer, it is necessary to use a signal amplifier related to the mentioned sensor. The actuator tested in this research was an electromagnetic type with a force capacity of 100 newtons and a wide frequency bandwidth of 4 kHz. The STM32 card in this research setup plays the role of generating the signal needed for identification. The programming done on the mentioned card provides the ability to generate signals such as sine, triangle, square, and chirp signal with the help of the card's digital to analog converter.

The purpose of the identification test in this research is to identify the dynamic model of the VCM actuator along with the weight attached to it. By placing weights of 146, 354, 425 grams on the actuator and performing an identification test for each weight, a suitable conversion function is obtained.

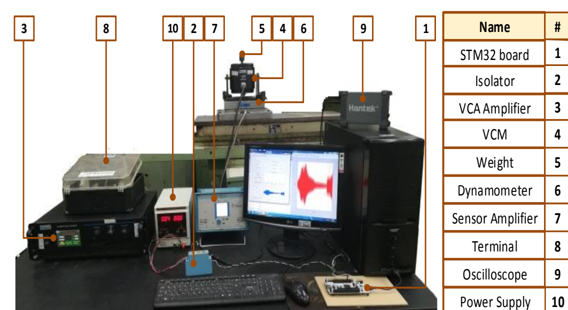


Figure 1. Test setup for actuator identification

3. Identification test

A chirp signal is used to stimulate the electromagnetic actuator. These signals linearly sweep the range 60 to 160 Hz with a frequency step of 1 Hz in a period of 3 seconds. In order to generate the excitation signal, the STM32 card digital-to-analog converter was used along with the direct memory access (DMA) unit. The data acquisition process was also done by a Hantek digital oscilloscope with a sampling rate of 200 kHz. Based on the voltage range of the signals and the settings made on the dynamometer amplifier, the voltage received from the output signal is converted into a power unit with a factor of 10 newtons per volt.

4. Transfer function calculation

Due to the existence of an actuator and a weight installed on it in the test setup, the order of the dynamic system is considered two for all the weights. If an inappropriate output is reached, the order of the dynamic system must be increased, but otherwise, the lowest order that has a suitable estimation percentage is selected. The basic assumptions considered to calculate the simulation model include the invariance of the system with respect to time and its linearity. The method used for the identification process is the output-error model. Output error models are a special configuration of polynomial models. By using data in the frequency range and continuous-time

* Manuscript received: 05 January 2022, Revised, 07 June 2022, Accepted, 28 June 2022.
[1]. MSc Student in Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
[2] MSc Student in Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
[3]. Corresponding author, Professor in Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
Email: imani@um.ac.ir

equations, it is possible to estimate the transformation function based on the output error model. In these calculations, the amount of delay of the input signal data compared to the output signal data is considered.

5. Identification test result

Using the identification tool available in MATLAB software, the results were obtained. The identification process is repeated for the weights of 146, 354 and 425 grams, and the coefficients of the transformation functions obtained for each one are changed according to the value of the loaded weight. In order to evaluate the accuracy of the estimation of the conversion function, first the experimental data of the input signal (time domain) are multiplied by the conversion function to obtain the modeled output. Then, the experimental data of the output signal in the time domain is compared with the modeled output. This comparison is based on the mean square of the normal error. The highest amount of similarity corresponds to the test of 354 grams, which is 80.58%, and the lowest is 80.20%, corresponding to the weight of 425 grams. Figure 2 shows the fitting diagram of the simulated output along with the experimental output signal for a weight of 354 grams.

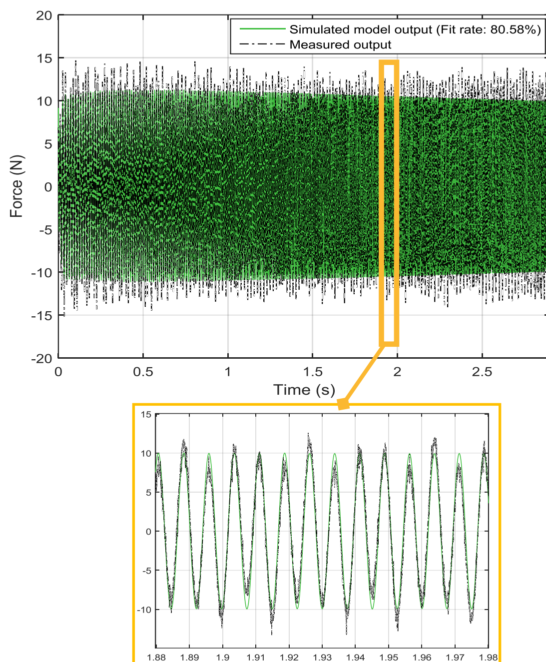


Fig.2. Simulated and real output signal for 354 gr

6. Conclusion

The identification test was performed on the actuator in a state where different weights were attached to it. By implementation this test in the frequency range of 60 to 160 Hz, the noise frequency can be removed without damaging the information of the received signal. The highest rate of similarity between the experimental signal and the signal obtained from the simulation was 80.58% (at the time of connecting the weight of 354 grams) and the lowest rate of similarity was 80.2% (at the time of connecting the weight of 425 grams).

DOI: 10.22067/jacsm.2022.74559.1084
https://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir/

شناسایی پارامترهای موتور خطی الکترومغناطیسی به‌منظور تولید نیروی اینرسی با استفاده از میکروکنترلر ARM*

پژوهشی

مهران مظفری جوین[(۱)] سید علیرضا داودی ناوخ[(۱)] بهنام معتکف ایمانی[(۲)]

چکیده *یکی از زمینه‌های پژوهشی مهمی که امروزه ضرورت آن بیش از پیش در صنایع مختلف حس می‌شود، فرایند کنترل نیروی عملگرها به‌صورت بلادرنگ است که برای تحقق بخشیدن به این مهم و دستیابی به بهترین عملکرد عملگر نیاز است ابتدا پارامترهای مدل دینامیکی آن شناسایی شوند. در این پژوهش به‌منظور شناسایی پارامترهای عملگر الکترومغناطیسی، بستر آزمایشی طراحی و ساخته شده‌است که در این سیستم، فرایند تولید سیگنال مرجع برای شناسایی به‌صورت بلادرنگ توسط کارت STM32F746ZG انجام می‌پذیرد. میکروکنترلر ARM-Cortex M7 کارت مذکور امکان تولید هر نوع سیگنال با فرکانس، دامنه و میانگین مورد نظر را فراهم کرده‌است. در این بستر آزمایشگاهی برای شناسایی سیستم یک سیگنال هارمونیک فرکانس متغیر چیرپ تولید شده‌است تا رفتار عملگر را در بازه‌های فرکانسی مختلف بررسی نماید. مقدار نیروی اینرسی خروجی از عملگر توسط دینامومتر Kistler مدل 9255B اندازه‌گیری می‌گردد. در نهایت با تحلیل پاسخ سیستم، مدل دینامیکی مناسب برای بستر آزمایشی با موفقیت تخمین زده می‌شود.*

واژه‌های کلیدی شناسایی سیستم، عملگر الکترومغناطیسی، کارت STM32، سیگنال چیرپ.

مقدمه

عملگر یا موتور خطی دستگاهی است که معمولاً فرمان را در قالب یک سیگنال الکتریکی دریافت می‌کند، سپس با تغییر ماهیت و تقویت توان آن، صورت‌های دیگری از انرژی را ایجاد خواهد کرد. اصطلاح عملگر خطی طیف وسیعی از محصولات را شامل می‌گردد. از زاویه‌ای دیگر عملگر خطی یک وسیله مکانیکی است که با استفاده از نیروی الکترومغناطیس، هوا یا مایع حرکت در یک راستا را به وجود می‌آورد[1] که بر اساس نحوهٔ تولید نیرو به دسته‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند. از معروف‌ترین عملگرهای مورد استفاده در صنایع گوناگون می‌توان به انواع عملگرهای خطی هیدرولیکی اشاره نمود. این عملگرها نیروی خروجی لازم را از طریق فشار هیدرواستاتیکی وارد شده به پیستون متحرک درون سیلندر تأمین می‌کنند. وظیفهٔ کنترل موقعیت سیلندر در عملگرهای هیدرولیکی برعهدهٔ شیر سرووهیدرولیک و یک پمپ می‌باشد[2]. این عملگرها اغلب در دستگاه‌هایی با نیروی مورد نیاز در حد چندین تن و فرکانس کاری کمتر از ۲۰ هرتز کاربرد دارند. ساختار عملگرهای خطی پنوماتیک، مشابه عملگرهای خطی هیدرولیکی می‌باشد با این تفاوت که به‌جای نیروی مایع از گازهای فشرده برای تأمین فشار درون سیلندر استفاده می‌شود. دارا بودن عوامل غیرخطی و پارامترهای متغیر با زمان، استفاده از این عملگرها را با مشکل روبه‌رو می‌کند[3].

دستهٔ دیگری از عملگرها که کاربرد آن‌ها رو به افزایش است، پیزوالکتریک‌ها هستند. این عملگرها تبدیلی کارامد از انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی را امکان‌پذیر می‌کنند. مهم‌ترین مزیت عملگرهای پیزوالکتریک حساسیت بالا و دقت جابه‌جایی در حد نانومتر است اما در مقابل نقطه ضعف این عملگرها مربوط به پدیدهٔ هیسترزیس (Hysteresis) موجود در مواد پیزوالکتریک است که کنترل انبساطی آن‌ها را به‌صورت تکرار شونده، دشوار می‌کند[4].

یکی از روش‌های تولید نیرو در عملگرها، استفاده از نیروی مغناطیسی حاصل از دو سیم‌پیچ ثابت و متحرک می‌باشد که طرز کار عملگرهای الکترومغناطیسی بر این اساس بنیان شده‌است. به همین سبب عملگرهای الکترومغناطیسی پاسخ زمانی سریع‌تری نسبت‌به دیگر عملگرها دارند و محدودهٔ فرکانسی وسیع‌تری را پشتیبانی می‌کنند. از معروف‌ترین نوع این عملگرها می‌توان به

*تاریخ دریافت مقاله۱۴۰۰/۱۰/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۴/۷ می‌باشد.
(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
(۲) نویسنده‌ی مسئول، استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
Email: imani@um.ac.ir

VCM اشاره کرد که به آن موتور الکترومغناطیس هم گفته می‌شود. این عملگرها به لحاظ ساختاری از دو بخش تشکیل شده‌اند، بخش بیرونی آن‌ها یک آهن‌ربای مغناطیس دائم است که یک میدان مغناطیسی ثابت تولید می‌کند و بخش داخلی یک سیم‌پیچ شعاعی متحرک می‌باشد که در این میدان مغناطیسی با یک فنر معلق شده‌است[5].

امروزه دامنهٔ کاربرد عملگرهای الکترومغناطیسی بسیار گسترش یافته‌است به‌طوری‌که در تجهیزات با دقت بالا نظیر ضربان‌سازهای قلب تا صنایع هوافضا، جاذب‌های دینامیکی و در فرایندهایی که فرکانس کاری بالایی نیاز دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دسته از عملگرها توانایی تولید نیرو در بازه‌های فرکانسی بسیار متنوعی را دارند که مقدار این نیروی خروجی با اندازهٔ سیم‌پیچ داخلی آن‌ها متناسب است. با توجه به ساختار عملگرهای الکترومغناطیسی، مصرف انرژی و هزینهٔ تعمیر و نگهداری پایین‌تری نسبت‌به عملگرهای مشابه دارند. اما نکتهٔ حائز اهمیتی که این نوع عملگرها را از سایرین متمایز می‌نماید، شتاب بسیار بالای خروجی آن‌ها است که سرعت پاسخ بالایی ایجاد کرده و سیگنال فرمان ورودی را به‌خوبی و دقیق پیروی می‌کند که این مهم در کنترل نیروی عملگر تأثیر به‌سزایی می‌گذارد. به‌منظور کنترل نیروی خروجی عملگر مغناطیسی نیاز است ابتدا رفتار عملگر تحت شرایط مختلف بررسی شود تا پارامترهای دینامیکی عملگر قابل شناسایی باشند. در فرایند شناسایی پارامترهای یک سیستم دینامیکی، اغلب یک سیگنال ورودی یا مرجع به سیستم اعمال می‌شود و سپس با تحلیل خروجی سیستم نسبت‌به آن ورودی مرجع پارامترهای مورد نیاز تخمین زده می‌شوند. سیگنال ورودی وابسته به نوع سیستم متفاوت می‌باشد، از معروف‌ترین سیگنال‌ها برای شناسایی سیستم می‌توان به سیگنال پله، نویز سفید و چیرپ اشاره نمود که در این پژوهش از سیگنال فرکانس متغیر چیرپ استفاده شده‌است تا رفتار عملگر در بازه‌های فرکانسی متفاوت مورد ارزیابی قرار بگیرد. برای تولید سیگنال شناسایی پارامترهای دینامیکی عملگر، از کارت STM32F746ZG به‌عنوان مرجع تولیدکننده سیگنال بهره گرفته شده‌است که بدین منظور مبدل دیجیتال به آنالوگ کارت مذکور توانایی بالایی در ایجاد سیگنال‌های مختلف به آن می‌بخشد. در فرایند تولید سیگنال توسط کارت برای افزایش نرخ داده‌گذاری مبدل دیجیتال به آنالوگ، واحد دسترسی مستقیم به حافظه مربوط به کارت راه‌اندازی شده‌است که باعث می‌شود داده‌های به‌صورت بلادرنگ از حافظه به مبدل دیجیتال به آنالوگ انتقال پیدا کنند. هنگامی که بخش دسترسی مستقیم به حافظه فعال باشد، واحد پردازش مرکزی کارت مورد استفاده قرار نمی‌گیرد که به موجب آن از اتلاف قدرت پردازشی کارت برای کارهای سبک‌تر جلوگیری می‌شود. در این پژوهش با برنامه‌نویسی‌های انجام شده به‌منظور فعال‌سازی و هماهنگ کردن بخش‌های مختلف کارت STM32 امکان تولید هر نوع سیگنال با شکل موج و فرکانس مورد نیاز فراهم شده‌است که این قابلیت در شناسایی و کنترل سیستم‌های دینامیکی همانند عملگرها بسیار ارزشمند و مفید واقع می‌شود.

مطالعه و بررسی پژوهش‌های پیشین صورت گرفته در زمینهٔ عملگرها و روش‌های شناسایی مربوط به آن‌ها حاکی از متنوع بودن آزمایش‌ها برای دستیابی به کنترل دقیق‌تر نیروی خروجی عملگر بوده‌است اما در اکثر آن‌ها به مسئله شناسایی پارامترهای دینامیکی عملگر و نحوه تولید سیگنال مرجع مطلوب با کارت‌های کنترلی به‌طور خاص پرداخته نشده‌است.

به‌عنوان مثال در پژوهشی با استفاده از دو عملگر خطی VCM، به کاهش ارتعاشات تولیدی موتور در خودروهای سواری پرداخته شده‌است. به‌کارگیری این عملگرها به دلیل داشتن گستره وسیع فرکانسی و پاسخ سریع در از بین بردن ارتعاشات مضر کاربرد فراوانی دارد. فرکانس نمونه‌برداری در آزمایش‌های مربوط به این پروژه حدود ۱۰ کیلوهرتز است. در این تحقیق ابتدا با اتصال VCM به یک نیروسنج و شتاب‌سنج میزان نیروی تولیدی عملگر و مقدار فرکانس طبیعی آن اندازه‌گیری می‌شود. در این بستر دامنه نیروی کاری ثابت و به میزان ٦۰ نیوتون است که به وسیله یک سیگنال سینوسی و از نوع مدولاسیون عرض پالس (PWM) تولید شده است. بالا بردن فرکانس داده‌برداری به سریع‌تر شدن فرایند کنترل کمک شایانی می‌کند. عدم کنترل دامنه نیروی عملگر، باعث کاهش توانایی و مزایای سیستم کنترلی می‌شود. با این وجود محرک‌های نصب شده در اسکلت زیرین خودرو می‌توانند ارتعاشات حاصل از کار موتور در دور ۱۵۰۰ دور بر دقیقه را ۲۵ الی ٤۰ درصد کاهش دهند[6].

McMahan و همکاران، با استفاده از شکل موج نوسانی بر روی یک محرک خطی سیم پیچ (که به آن محرک رزونانس خطی نیز گفته می‌شود)، به ایجاد ارتعاش همراه با فرکانس بالا در این

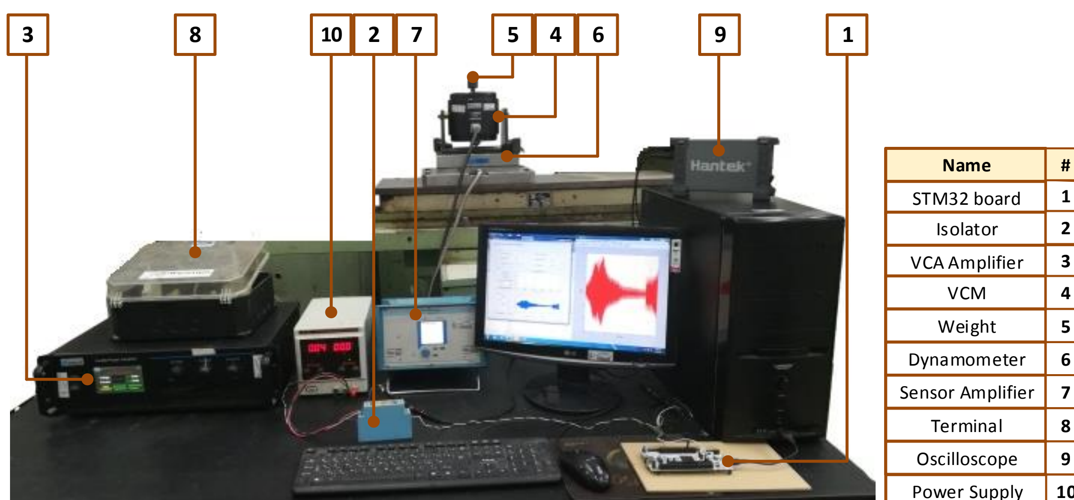
دستگاه می‌پردازند. این پژوهش به دنبال بهینه‌سازی، تجزیه و تحلیل در عملکرد این دسته از دستگاه‌های محرک است. پاسخ دینامیکی این محرک‌ها بستگی زیادی به مواد مورد استفاده در تعلیق آن‌ها دارد. غیر خطی بودن سیستم تعلیق نسبت‌به دامنه سیگنال ورودی موجب ایجاد تغییرات ناخواسته در فرکانس تشدید خواهد شد که این رفتار پیش‌بینی سیگنال پاسخ را دشوار می‌کند. به همین دلیل باید به جای لاستیک‌های سیلیکونی از نئوپرین‌ها (Neoprene) یا فنرهای مارپیچ استفاده کرد. زیرا سفتی خارج از محور بالا در آن‌ها باعث ایجاد رفتاری خطی‌تر در تعلیق محرک می‌شود. نویسندگان برای جبران اعوجاج باقی‌مانده نیز از الگوریتم‌های کنترلی بهره می‌برند. برای تولید سیگنال فرمان عملگر در بستر آزمایشی از کارت جمع‌آوری داده‌های (DAQ) چندمنظوره با نرخ نمونه‌برداری ۱۰ کیلوهرتز به‌کار گرفته شده‌است. هم‌چنین این کارت دریافت داده را از یک حسگر شتاب‌سنج انجام می‌دهد؛ در حالی که برخی از پارامترهای دستگاه توسط سازنده ارائه می‌شوند یا می‌توان مستقیم آن‌ها را اندازه‌گیری کرد، بقیه پارامترها باید به‌صورت تجربی مشخص شوند. در این پژوهش از تکنیک‌های جعبه ابزار شناسایی سیستم نرم‌افزار متلب استفاده شده‌است. جهت انجام آزمایش شناسایی، عملگر با فرمان سیگنال دوره‌ای جاروب سینوسی تحریک می‌شود که یکی از بهترین نوع سیگنال‌ها تحریک در آزمون‌های شناسایی به شمار می‌آید. سیگنال سینوسی مذکور به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شده که در طول ۳ ثانیه از ۱۰ تا ۱۰۰۰ هرتز را به‌صورت لگاریتمی جاروب خواهد کرد[7].

در مطالعه‌ای به دنبال عملکرد مطلوب به‌منظور از بین بردن ارتعاشات زیان‌آور در سازه‌های عمرانی، از عملگرهای الکترومغناطیسی و میراگرهای الکترومغناطیسی (EMD) برای ایجاد میرایی در سازه استفاده شده‌است. در این مطالعه با هدف کاهش ارتعاشات ناخواسته در سازه‌ها از کنترل عملگر خطی سیم‌پیچ به‌عنوان یک میراگر الکترومغناطیسی بهره گرفته شده‌است. در انتها برای انجام آزمون شناسایی، یک سیگنال دوره‌ای جاروب سینوسی به بستر آزمایشی اعمال می‌شود که به دلیل وجود برخی رفتارهای غیر خطی، خروجی‌های شبیه‌سازی شده مناسب نبودند. تولید نیروی کم توسط این نوع از عملگرها، موجب ضعیف بودن کارایی آن‌ها در کاربردهای این چنینی می‌شود[8].

نمونه‌ای دیگر از کاربردهای صنعتی عملگرهای الکترومغناطیسی، کنترل ارتعاشات لرزش در فرآیند داخل‌تراشی بوده‌است. در تحقیق مذکور با بهره‌گیری از یک عملگر VCM که دارای رفتار دینامیکی خطی بوده‌است، کنترلری به‌منظور کنترل فعال نیروی خروجی عملگر طراحی شده‌است تا به کمک آن پایداری ابزار برشی در حین ماشین‌کاری افزایش یابد که در نهایت منجر به بهبود کیفیت سطح قطعه و میرایی ارتعاشات لرزش می‌گردد. برای دستیابی به مدل دینامیکی کارآمد در ابزار داخل تراش میراشده مجهز به عملگر الکترومغناطیس، یک آزمون شناسایی صورت گرفته‌است که در این آزمایش سیگنال دوره‌ای جاروب سینوسی در بازهٔ فرکانسی ۵۰ تا ۱۲۵۰ هرتز برای تحریک بستر آزمایشی مورد استفاده قرار گرفته‌است[9].

بستر آزمون

همانند شکل (۱) در بستر آزمایش طراحی شده به‌منظور شناسایی پارامترهای دینامیکی عملگر، از یک دینامومتر ساخت شرکت سوئیسی KISTLER برای اندازه‌گیری نیروهای دینامیکی بهره گرفته شده‌است که توانایی سنجش نیرو در سه محور را دارا است. صلب بودن دینامومتر منجر به بزرگ بودن فرکانس طبیعی آن می‌شود. به دلیل پایین بودن سطح ولتاژ خروجی دینامومتر نیاز است تا از یک تقویت‌کننده سیگنال مربوط به حسگر مذکور استفاده شود. عملگر مورد آزمایش در این پژوهش، از نوع الکترومغناطیسی با ظرفیت نیرویی ۱۰۰ نیوتن و پهنای باند فرکانسی ٤ کیلوهرتز بوده‌است. کارت STM32 در این بستر تحقیقاتی نقش تولیدکننده سیگنال مورد نیاز برای شناسایی را ایفا می‌کند. برنامه‌نویسی انجام‌شده بر روی کارت مذکور، قابلیت تولید سیگنال‌هایی نظیر سینوسی، مثلثی، مربعی و سیگنال چیرپ را به کمک مبدل دیجیتال به آنالوگ کارت فراهم می‌کند.



شکل ۱ بستر آزمایشی مورد استفاده برای شناسایی عملگر

هدف از انجام آزمون شناسایی در این پژوهش، شناسایی مدل دینامیکی عملگر VCM به همراه وزنه متصل به آن است. این آزمون با گذاشتن وزنه‌های مختلف بر روی عملگر تکرار شده‌است تا برای هر وزنه یک تابع تبدیل مناسب حاصل شود. این وزنه‌ها در مقادیر ۱۴۶، ۳۵۴، ۴۲۵ گرم انتخاب شده و همانند شکل (۲) به عملگر متصل گردیده‌است. به‌منظور تحریک عملگر الکترومغناطیسی سیگنال چیرپ با طیف فرکانسی ۶۰ تا ۱۶۰ هرتز مورد استفاده قرار گرفت. فرض‌های ابتدایی درنظر گرفته شده برای محاسبه مدل شبیه‌سازی شامل نامتغیر بودن سیستم نسبت‌به زمان و خطی بودن آن می‌شود.



شکل ۲ نصب وزنه‌ها بر روی عملگر و اتصال آن به دینامومتر

آزمون شناسایی

در فرایند تولید سیگنال مرجع به‌منظور شناسایی سیستم، معادلات ریاضی سیگنال‌های استاندارد (اشکال کسینوس، مثلثی و موج مربعی) در ادامه توضیح داده می‌شود. هم‌چنین پارامترهای تعیین کننده آن‌ها نیز در جدول (۱) مورد بررسی قرار داده شده‌است. شکل موج چیرپ کسینوسی و برخی از پارامترهای آن براساس روابط (۱) الی (۳) و برخی از پارامترهای موجود در آن قابل تعریف است [10].

جدول ۱ مشخصه‌های سیگنال چیرپ [10]

مشخصه	پارامتر	واحد
دامنه	A	ولت
میانگین	A_0	ولت
فاز اولیه	φ_0	رادیان
فرکانس اولیه	F_s	هرتز
فرکانس نهایی	F_f	هرتز
دوره چیرپ	T_c	ثانیه
متغیر زمانی	t	ثانیه
نرخ جاروب	α	هرتز بر ثانیه

$$S_{hc}(t) = A\cos(2\pi f(t)t + \varphi_0) + A_0 \qquad (۱)$$

$$f(t) = F_s + \frac{\alpha}{2}t \qquad (۲)$$

$$\alpha = (F_f - F_s)/T_c \qquad (۳)$$

سیگنال چیرپ مربعی هم به‌طور مشابه از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد که در آن sgn تابع علامت استاندارد است.

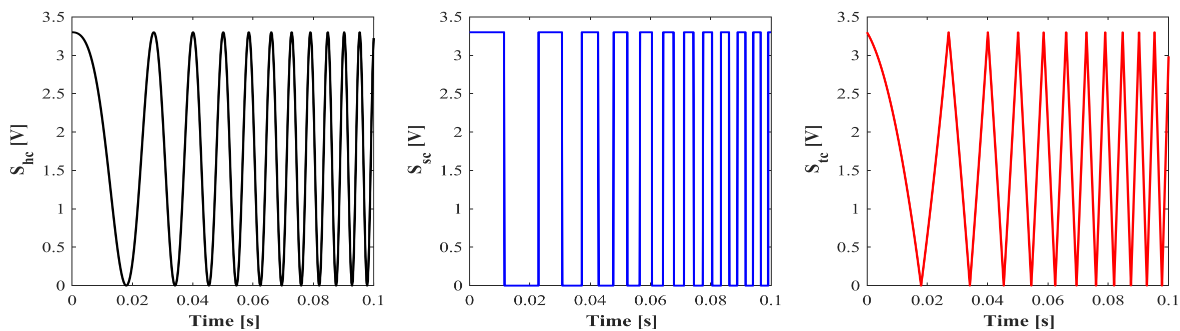
$$S_{sc}(t) = A\,\mathrm{sgn}(\cos(2\pi f(t)t + \varphi_0)) + A_0 \quad (٤)$$

بر همین اساس سیگنال چیرپ مثلثی را می‌توان به‌صورت رابطه (۵) بیان کرد.

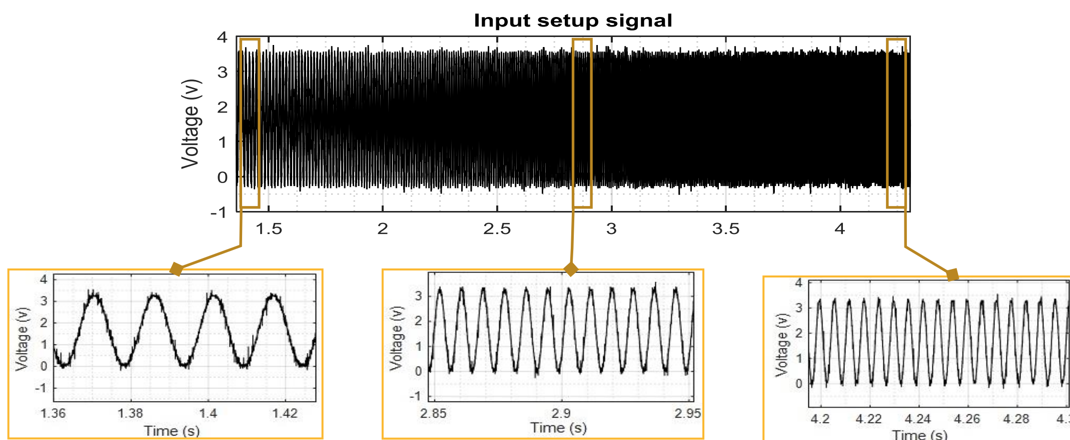
$$S_{tc}(t) = -\frac{2A}{\pi}\cos^{-1}(\cos(2\pi f(t)t + \varphi_0)) + (A + A_0) \quad (٥)$$

عبارت فرکانس متغیر خطی $f(t)$ برای تمامی سیگنال‌ها توسط برنامه محاسبه می‌شود. تصویر معیار سیگنال‌های چیرپ در شکل (۳) نشان داده شده‌است. از آن‌جایی که مبدل دیجیتال به آنالوگ نمی‌تواند مقادیر منفی را بپذیرد و ولتاژ خروجی کارت STM حداکثر ۳/۳ ولت است، این سیگنال‌ها با حداکثر دامنه ۱/۶۵ ولت و مقدار متوسط ۱/۶۵ ولت ترسیم می‌شوند. واضح است که فرکانس‌های سیگنال به صورت خطی با زمان تغییر می‌کند.

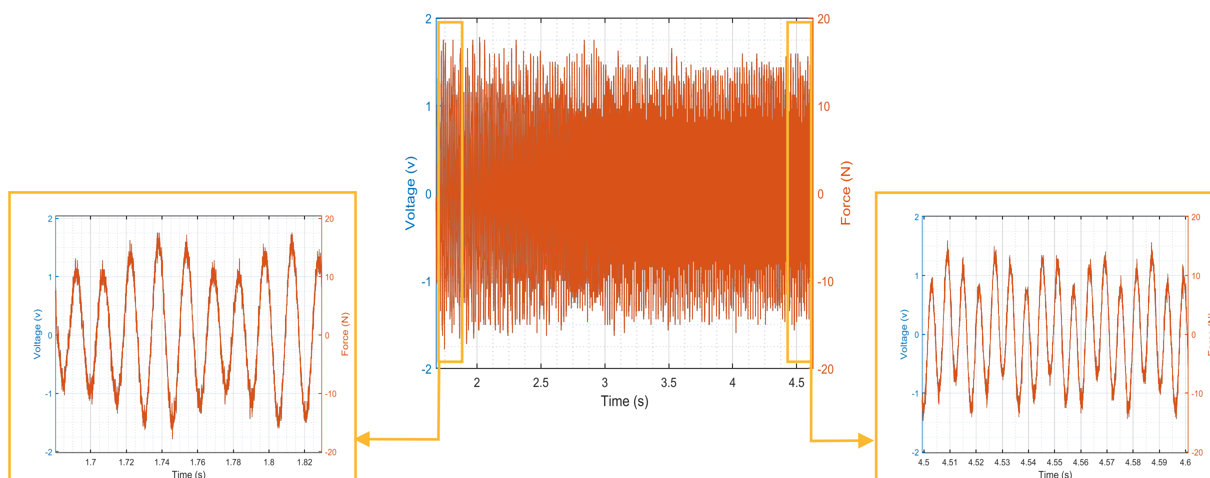
سیگنال تحریک اعمالی برای هر وزنه و پاسخ سیستم به آن در شکل‌های (٤) تا (۷) نشان داده شده‌است. سیگنال‌های تحریک در مدت زمان ۳ ثانیه، بازه ٦۰ تا ١٦۰ هرتز را با گام فرکانسی ۱ هرتز جاروب می‌کنند. به‌منظور تولید سیگنال شناسایی‌کننده از مبدل دیجیتال به آنالوگ کارت STM32 در کنار واحد دسترسی مستقیم به حافظه (DMA) استفاده شده‌است و فرایند داده‌برداری نیز توسط اسیلوسکوپ دیجیتال Hantek با نرخ نمونه‌برداری ۲۰۰ کیلوهرتز صورت پذیرفت. در تمامی این شکل‌ها رفتار سیگنال خروجی تا اندازه‌ای یکسان است. میانگین سیگنال خروجی برای هر وزنه نزدیک به صفر مشاهده می‌شود. براساس دامنه ولتاژی سیگنال‌ها و تنظیمات انجام‌شده بر روی تقویت کننده دینامومتر، ولتاژ دریافت شده از سیگنال خروجی با ضریب ۱۰ نیوتون بر ولت به واحد نیرو تبدیل می‌شود. تغییرات نیرویی نشان داده شده در شکل‌های (۵) تا (۷) بیانگر بازه نیروی تولیدی توسط عملگر است. برای تمامی وزنه‌ها، گستره این بازه در بیشترین حالت خود به مقدار ۳۵ نیوتون می‌رسد.



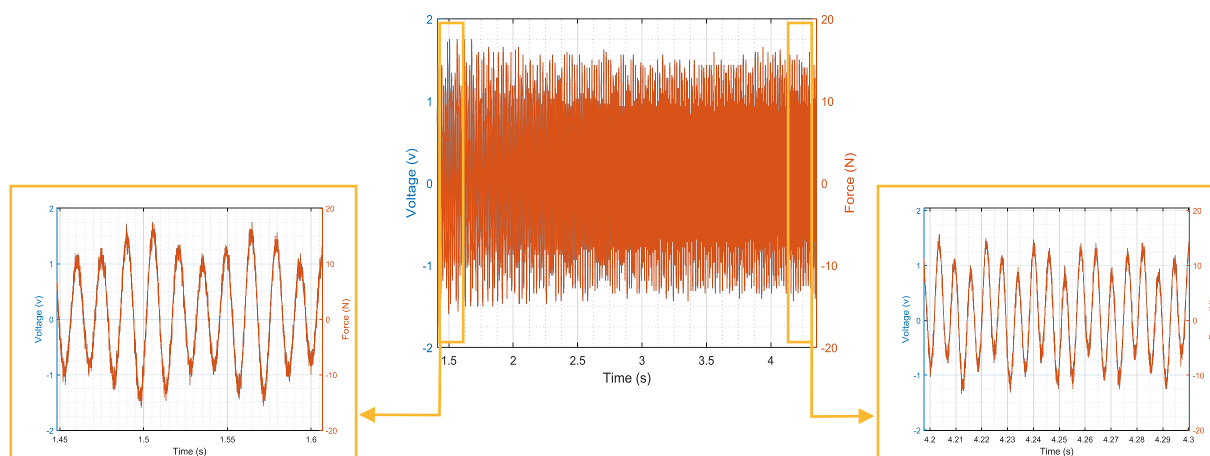
شکل ۳ شکل موج‌های مختلف با فرکانس‌های خطی متغیر



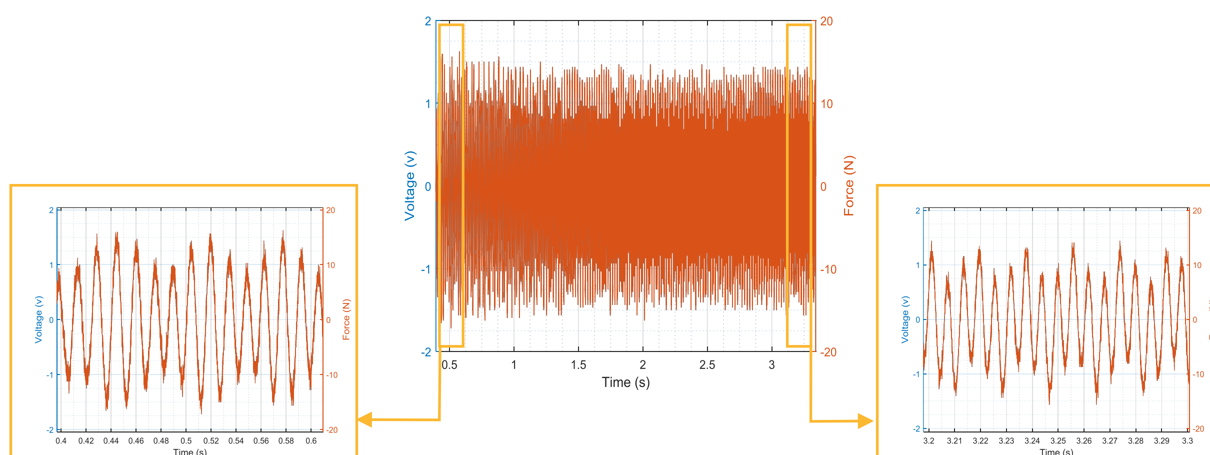
شکل ٤ سیگنال تحریک ورودی برای تمامی وزنه‌ها



شکل ۵ دامنه نیرو و ولتاژ سیگنال خروجی برای وزنه ۱٤٦ گرمی

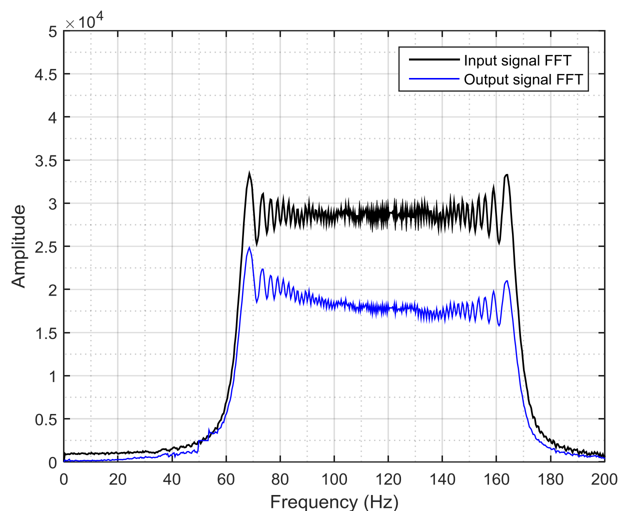


شکل ٦ دامنه نیرو و ولتاژ سیگنال خروجی برای وزنه ۳٥٤ گرمی

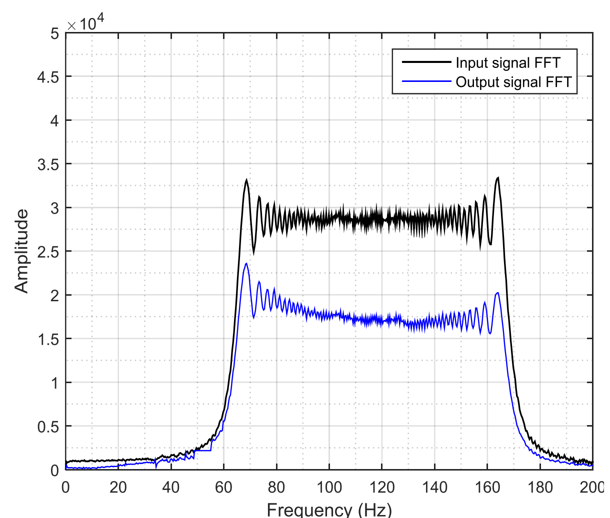


شکل ۷ دامنه نیرو و ولتاژ سیگنال خروجی برای وزنه ٤۲٥ گرمی

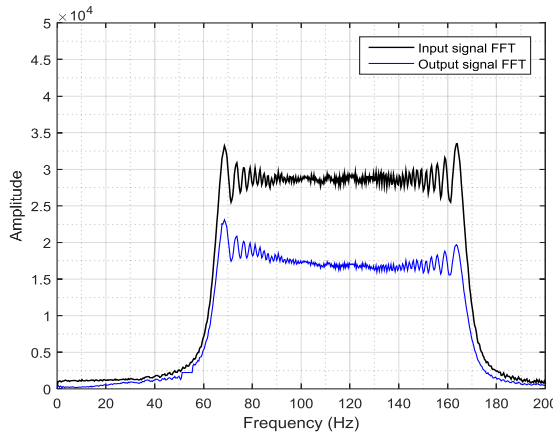
سیگنال‌های ورودی و خروجی ذخیره‌سازی شده به حوزه فرکانس انتقال می‌یابند تا رفتار فرکانسی آن‌ها بهتر مورد بررسی قرار گیرند. شکل‌های (۸) الی (۱۰) از تبدیل فوریه سریع (FFT) داده‌های حوزه زمان به دست آمده‌اند. سرعت تغییر فرکانس سیگنال خروجی نسبت‌به زمان در فرکانس‌های ابتدایی کمی بیشتر است و در ادامه کمتر می‌شود. این رفتار در سیگنال خروجی تمامی وزنه‌ها موجود است. در هیچ کدام از این شکل‌ها وجود فرکانس طبیعی در بازه فرکانسی سیگنال تحریک قابل مشاهده نمی‌باشد.



شکل ۸ طیف فرکانسی سیگنال‌های ورودی و خروجی در زمان اتصال وزنه ١٤٦ گرمی



شکل ۹ طیف فرکانسی سیگنال‌های ورودی و خروجی در زمان اتصال وزنه ٣٥٤ گرمی



شکل ۱۰ طیف فرکانسی سیگنال‌های ورودی و خروجی در زمان اتصال وزنه ٤٢٥ گرمی

محاسبه تابع تبدیل

به دلیل وجود یک عملگر و وزنه نصب شده بر روی آن در بستر آزمایشی، مرتبه سیستم دینامیکی برای تمامی وزنه‌ها دو در نظر گرفته می‌شود. در صورت رسیدن به خروجی نامناسب باید مرتبه سیستم دینامیکی افزایش پیدا کند ولی در غیر این صورت کمترین مرتبه‌ای که درصد تخمین مناسبی داشته باشد انتخاب می‌گردد. روشی که برای فرایند شناسایی از آن استفاده می‌شود، مدل خطای خروجی (Output-error model) است. مدل‌های خطای خروجی پیکربندی خاصی از مدل‌های چندجمله‌ای هستند که ساختار کلی آن‌ها در روابط (٦) الی (٨) ارائه شده‌است.

$$y(t) = \frac{B(s)}{F(s)}u(t) + e(t) \qquad (٦)$$

$$nb:\ B(s) = b_{nb}s^{(nb-1)} + b_{nb-1}s^{(nb-2)} + \cdots + b_1 \qquad (٧)$$

$$nf:\ F(s) = s^{nf} + f_{nf}s^{(nf-1)} + \cdots + f_1 \qquad (٨)$$

با به کارگیری داده‌ها در بازه فرکانسی و معادلات زمان پیوسته، تخمین خطای خروجی براساس یک تابع تبدیل همانند رابطه (۹) خواهد شد. مقادیر nb و nf به‌ترتیب بیانگر مرتبه صورت و مخرج تابع تبدیل هستند. همچنین e(t) خطای حاصل از اختلاف خروجی مدل شبیه‌سازی با خروجی تجربی است. در این محاسبات از میزان تأخیر داده‌های سیگنال ورودی نسبت‌به داده‌های سیگنال خروجی صرف‌نظر می‌شود.

$$G(s) = \frac{B(s)}{F(s)} = \frac{b_{nb}s^{(nb-1)} + b_{nb-1}s^{(nb-2)} + \cdots + b_1}{s^{nf} + f_{nf}s^{(nf-1)} + \cdots + f_1} \qquad (٩)$$

نتایج آزمون شناسایی

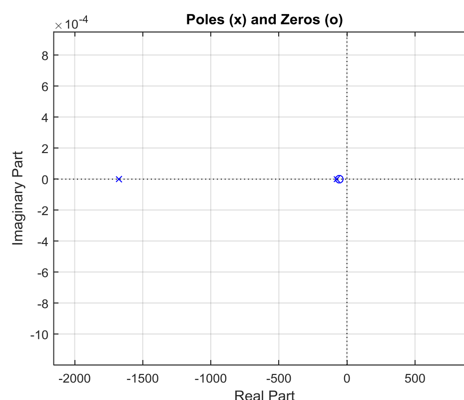
با استفاده از ابزار شناسایی موجود در نرم‌افزار متلب نتایج بیان‌شده در این بخش به‌دست آمده‌است. داده‌های سیگنال ورودی از جنس ولتاژ و در واحد ولت و سیگنال خروجی نیز از جنس نیرو و در واحد نیوتن است. فرایند شناسایی برای وزنه‌های ۱٤٦، ۳٥٤ و ٤۲٥ گرمی تکرار می‌شود. توابع تبدیل به‌دست‌آمده برای هر یک از این وزنه‌ها به ترتیب در رابطه‌های (۱۰) الی (۱۲) بیان شده‌اند. مقادیر ضرایب هر یک از توابع تبدیل متناسب با مقدار وزنه بارگذاری شده تغییر می‌یابد.

$$G_{146gr}(s) = \frac{-1.181e04 \times s - 6.604e05}{s^2 + 1751 \times s + 1.266e05} \quad (۱۰)$$

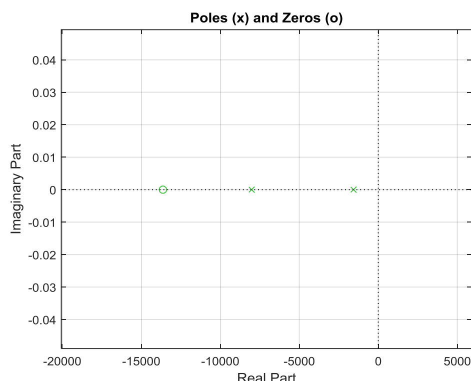
$$G_{354gr}(s) = \frac{-6375 \times s - 8.689e07}{s^2 + 9591 \times s + 1.26e07} \quad (۱۱)$$

$$G_{425gr}(s) = \frac{-475.4 \times s - 1.552e08}{s^2 + 1.668e04 \times s + 2.284e07} \quad (۱۲)$$

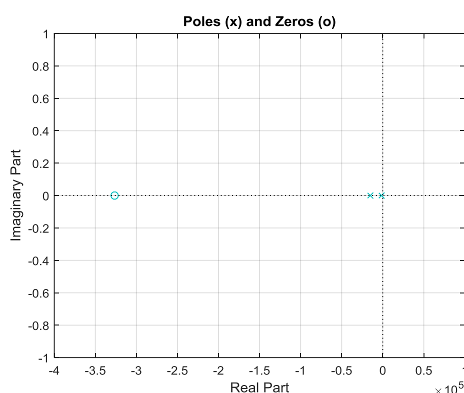
در ادامه مکان صفر و قطب‌های توابع تبدیل تمامی وزن‌ها در شکل‌های (۱۱) الی (۱۳) آورده شده‌است. تمامی قطب‌ها در سمت چپ محور حقیقی قرار دارند که نشان‌دهنده پایداری سیستم مدل‌سازی شده برای تمامی وزنه‌ها است. با افزایش وزن بارگذاری، قطب‌ها از محور موهومی دورتر می‌شوند که حاکی از افزایش سرعت پاسخ گذرای سیستم است. نداشتن مقدار موهومی، منفی بودن مقدار حقیقی و کمتر از یک بودن اندازه هر یک از قطب‌ها دلیلی بر پاسخ میرایی شدید در سیستم دینامیکی خواهد بود.



شکل ۱۱ نمایش صفر و قطب‌ها بر اساس تابع تبدیل به‌دست‌آمده برای وزنه ۱٤٦ گرمی



شکل ۱۲ نمایش صفر و قطب‌ها بر اساس تابع تبدیل به‌دست‌آمده برای وزنه ۳٥٤ گرمی



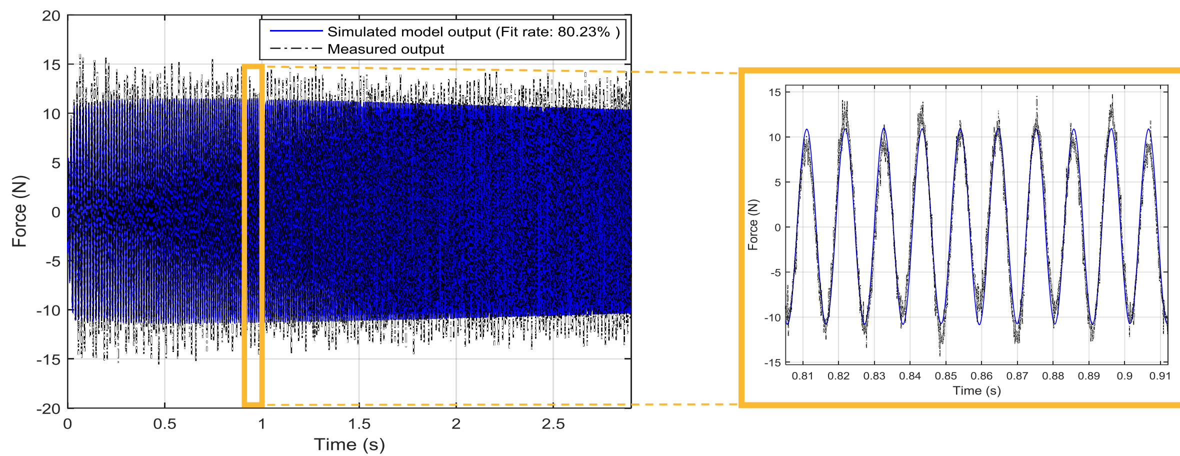
شکل ۱۳ نمایش صفر و قطب‌ها بر اساس تابع تبدیل به‌دست‌آمده برای وزنه ٤۲٥ گرمی

به‌منظور ارزیابی میزان دقت تخمین تابع تبدیل، ابتدا داده‌های تجربی سیگنال ورودی (حوزه زمان) در تابع تبدیل ضرب می‌شوند تا خروجی مدل‌سازی شده حاصل گردد. سپس باید داده‌های تجربی سیگنال خروجی در حوزه زمان را با خروجی مدل‌سازی شده مقایسه کرد. در رابطهٔ (۱۳) این مقایسه بر اساس معیار میانگین مربعات خطای نرمال ارائه شده‌است. برازش ۱۰۰ درصدی بدین معنی است که خروجی مدل با خروجی اندازه‌گیری شده مطابقت دارد. در این رابطه h(s) به‌عنوان منحنی پاسخ فرکانس تجربی تعریف می‌شود [11].

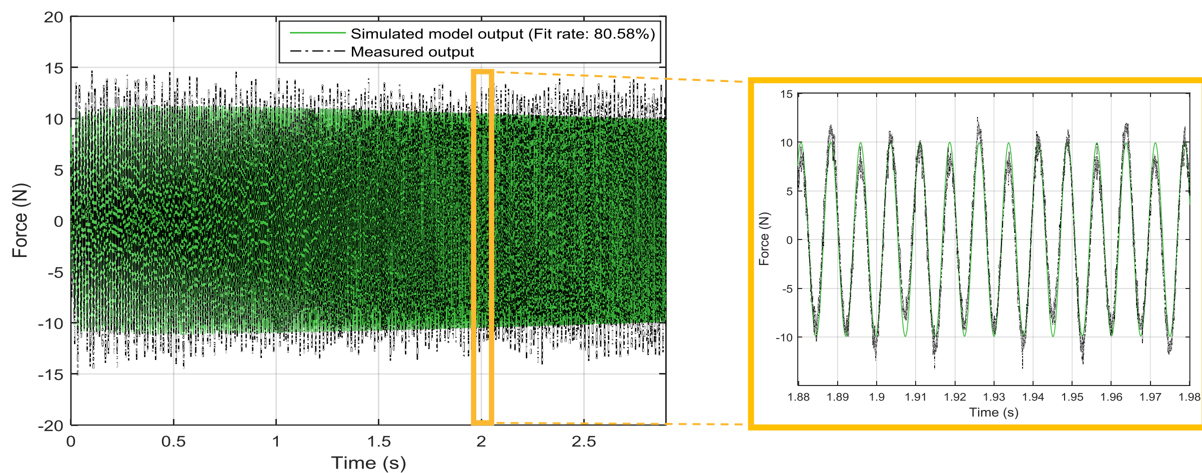
$$\eta_s = 100\left(1 - \frac{\|h(s) - G(s)\|_2}{\|h(s) - \mathrm{mean}(h(s))\|_2}\right) \quad (۱۳)$$

نمودارهای برازش خروجی شبیه‌سازی‌شده با خروجی تجربی نیز به‌ترتیب در شکل‌های (١٤) الی (١٦) به نمایش درآمده‌است. بیشترین میزان تشابه مربوط به آزمایش وزنه ۳٥٤

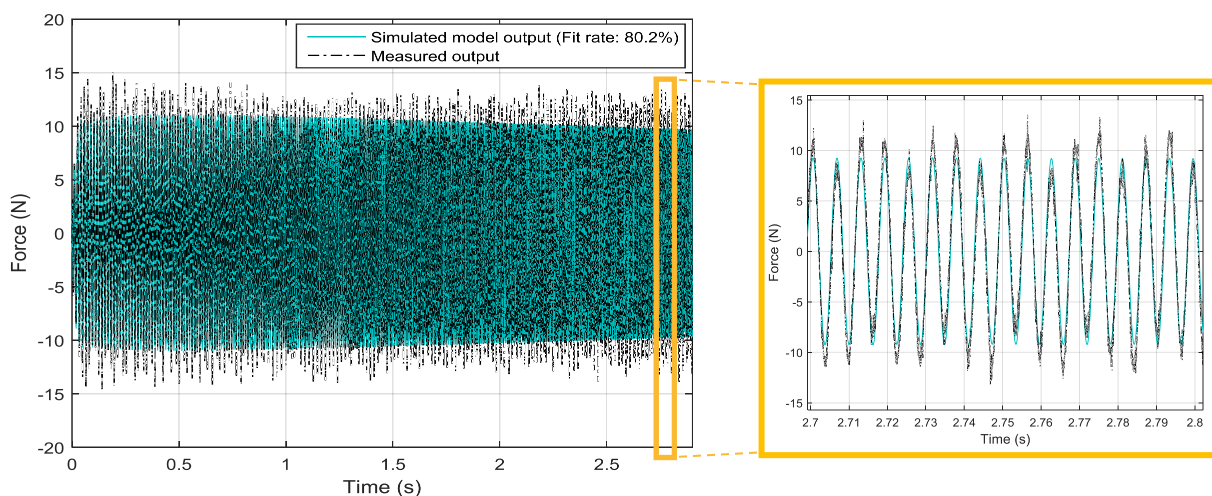
گرمی که برابر ۸۰/۵۸ درصد و کمترین آن مقدار ۸۰/۲۰ درصد و مربوط به وزنه ۴۲۵ گرمی می‌شود.



شکل ۱۴ سیگنال شبیه‌سازی شده و سیگنال خروجی واقعی برای وزنه ۱۴۶ گرم



شکل ۱۵ سیگنال شبیه‌سازی شده و سیگنال خروجی واقعی برای وزنه ۳۵۴ گرم



شکل ۱۶ سیگنال شبیه‌سازی شده و سیگنال خروجی واقعی برای وزنه ۴۲۵ گرم

جمع‌بندی

در این بخش آزمون شناسایی بر روی عملگر در حالتی که وزنه‌های مختلفی به آن متصل بود، صورت پذیرفت. با انجام این آزمون در طیف فرکانسی ٦٠ تا ١٦٠ هرتز می‌توان فرکانس نویز را بدون آسیب دیدن اطلاعات سیگنال دریافتی حذف کرد. بیشترین نرخ تشابه بین سیگنال تجربی و سیگنال حاصل از شبیه‌سازی به مقدار ٨٠/٥٨ درصد (در زمان اتصال وزنه ٣٥٤ گرمی) و کمترین نرخ تشابه ٨٠/٢ درصد (در زمان اتصال وزنه ٤٢٥ گرمی) به دست آمد.

واژه‌نامه

عملگر	Actuator
چیرپ	Chirp
شناسایی	Identification
سیگنال چیرپ هارمونیک	S_{hc}
سیگنال چیرپ مربعی	S_{sc}
سیگنال چیرپ مثلثی	S_{tc}
مرتبه صورت	Nb
مرتبه مخرج	Nf
خطا	e(t)
تابع تبدیل	G(s)
نرخ برازش	η_s

مراجع

1. Alegria, F., "*Sensors and Actuators* ", IST Press, (2021).
2. Ghoreshi, H., Moetakef Imani, B., Ghandaharion, A.M., "Design and implementation of digital control unit of fatigue test machine", *ICME10*, Babol, Iran, (2010), (In Persian).
3. Chavoshian, S.M., Taghizadeh, M., "Adaptive control for position control of a pneumatic actuator under variable loads", *Modares Mechanical Engineering,* Vol.16, No.6, Pp.181-188, (2016), (In Persian).
4. Rupitsch, S.J., "*Piezoelectric Sensors and Actuators*", Springer Verlag, (2019).
5. Safehian J, Akbari A A, Hosseini Sani S K. "The Novel Control Method for Voice Coil Actuator Fatigue Testing Machine". *Modares Mechanical Engineering*.Vol.17, No.7, Pp.79-90, (2017), (In Persian).
6. Kim, S.H., Park, U.H., Kim, J.H., "Voice Coil Actuated (VCA) Engine Mount for Vibration Reduction in Automobile", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 21, No. 3, Pp. 771-777, (2020).
7. McMahan, W., Kuchenbecker, K.J. "Dynamic Modeling and Control of Voice-Coil Actuators for High-Fidelity Display of Haptic Vibrations", *IEEE Haptics Symposium*, Houston, TX, USA. ,(2014).
8. Ao, W.K., Reynolds, P., "Evaluation of Optimal Analysis, Design, and Testing of Electromagnetic Shunt Damper for Vibration Control of a Civil Structure", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 27, No.3, (2019).
9. Fallah, M., Moetakef Imani, B., "Dynamic model identification of an active damped boring bar",". *Modares Mechanical Engineering*, Vol.19, No.8, Pp.1917-1928, (2019), (In Persian).
10. Fallah, M., Mozaffari, M., Davodi, A., "STM32 DAC TUTORIAL: with application to system identification", (2021).
11. Ljung L., "Experiments with Identification of Continuous Time Models", Linköpings university, *15th IFAC Symposium on System Identification*, Saint-Malo, France, (2009).